氣象通量技術在農業氣象觀測上之運用

姚銘輝 [1]、陳俊仁 [2]

[1] 行政院農委會農業試驗所 研究員
[2] 行政院農委會農業試驗所 助理研究員

摘要

本研究利用渦流相關偵測系統記錄作物整個生育期之通量資料，以作為驗證模式及監測環境之用。水稻田的二氧化碳對於溫室氣體的平衡佔有重要角色，水稻一期作之平均二氧化碳吸存量為 22.0 g m^{-2} day^{-1}，二期作為 17.9 g m^{-2} day^{-1}。利用通量技術量測二氧化碳通量之日碳平衡，以評估蝴蝶蘭園最佳溫度及光照條件，其結果將有助於在溫室栽培之蘭花管理。結果顯示，日/夜溫為 25 / 25℃可得葉片之最高日碳平衡，而由整個園區尺度之碳通量資料，最佳蘭園溫度範圍為 24 - 27℃之間。決定水稻的需水量對灌溉計畫非常重要，利用水汽通量系統量測蒸發散量構成因子，以估算水稻田實測資料並以評估四種估算潛勢能蒸發散模式之準確度，Penman-Monteith 法和其簡化方程式則較能符合實測值。此外，利用通量量測技術解決大面積監測果樹生理反應的限制。結果顯示，潛熱則與以氣溫及相對濕度所計算之水汽壓差相關係數最高($r = 0.70$)。因此，水汽壓差資料可做為荔枝果園水份管理之指標。

關鍵詞：通量、作物模式、氣候變遷、溫室氣體、蒸發散量。

一、前言

作物生長監測利用生理量測儀器僅能作單葉及定點量測，缺少長期且連續性監測功能，也無法提供大面積及夜間呼吸作用變化的監測，監測技術上的瓶頸限制一些議題的探討。氣象中所謂通量 (flux) 是利用具有高頻度偵測反應之儀器，配合電腦快速運算及儲存，所得之能量項瞬間值以共變異數 (covariance) 計算通量值 (Swinbank 1951)。雖然通量以輻射量、可感熱、水汽及二氧化碳等量測目標，但這些氣象通量測值也是作物生長監測的實際測值，通量系統已可將氣象變化及作物生理反應間作一結合，可應用於大面積農田之蒸發散量測 (Zhang *et al.* 2007)，潛熱或可感熱的傳送(Ortega-Farias *et al.* 2006）及二氧化碳吸存量評估 (Amiro 2010)等議題的研究。通量量測以能量項為重點，但也可解決量測作物生長及環境觀測上之限制。農業環境或作物生理的量測常受限於時間及空間尺度的限制，例如單一葉片光合作用速率如何代表整個田區作物植冠之固碳情形，或農田夜間呼吸作用如何量測等問題。本文之通量量測技術是以感測器長期監測為主，以大面積農田為量測範圍，希望對於此項技術之研究成果能擴大農業環境觀測之深度及廣度，有助於對作物長期生長及農業環境的觀測。

二、材料與方法

通量系統偵測儀器包括：三維音波風速計 (three dimensional sonic anemometer)：Young 81000 (R. M. Young Company, MI, USA)，輸出速度為 4-32 Hz。開放式二氧化碳/水汽分析儀

(open path CO_2/H_2O analyzer)：LICOR-7500 (LI-COR, Inc., NE, USA)，最高反應頻率為 20 Hz。細熱電偶線 (fine wire thermocouple)：線徑 12.7 μm，反應頻率大於 30 Hz。土壤濕度計 (soil moisture probe)：CS616 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。土溫計 (soil temperature sensor)：107-L (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)，埋設深度 10 公分。淨輻射計 (net radiometer)：REBS Q7.1 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)。土壤熱流板 (heat flux plate)：HFT3 (Campbell Scientific, Inc., UT, USA)，埋設深度 5 cm。所有感測器連接於 Campbell CR1000 資料蒐集器，系統程式依 Campbell 公司所提供加以修改，資料取樣頻率為 10 Hz，每 10 分鐘儲存一次資料，通量量測儀器及架設情形如圖 1 所示。程式中有關通量計算方式，CO_2 通量，潛熱 (latent heat) 及可感熱 (sensible heat) 通量依據 Yao *et al.* (2003) 所列之公式計算。

三、結果與討論

1. 利用二氧化碳通量推估蝴蝶蘭園之最佳溫度及光照條件

通量技術用於觀測溫室作物之固碳情形。以我國為例，蘭花溫室栽培是重要產業，如何精緻栽培及調節最佳生長環境非常重要。但蘭花（特別指蝴蝶蘭）屬於景天酸代謝（Crassulacean Acid Metabolism；CAM）植物，一般而言，此類作物之光合作用速率較 C3 或 C4 型植物為低，另外多肉厚葉特性在以光合作用分析儀量測時易使葉片受損。另外 CAM 代謝路徑普遍被認為是植物為適應乾燥環境演化而來，白天氣孔關閉以減少蒸散作用，至夜間才開啟氣孔固定二氧化碳，蘭花特殊生理習性常造成量測上的困難，而通量之長期且直接的量測方式，適足以解決此問題。本研究目的為利用渦流共變異數技術量測二氧化碳通量之日碳平衡，以評估蝴蝶蘭園最佳溫度及光照條件，其結果將有助於在溫室栽培之蘭花管理。結果顯示，日/夜溫為 25 / 25℃可得葉片之最高日碳平衡，而由整個園區尺度之碳通量資料，最佳蘭園溫度範圍為 24 - 27℃之間(圖 2)。由整年通量量測資料，日均溫與日碳平衡之相關係數為 0.65，然而，夜溫與二氧化碳固定較日溫與呼吸作用更顯著。景天科作

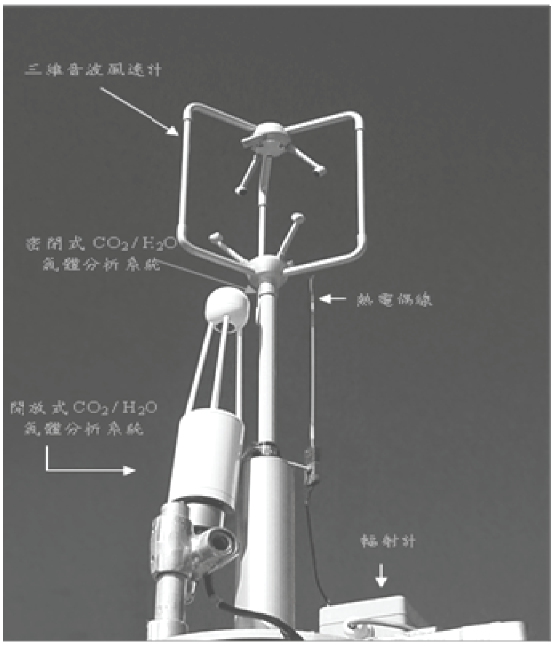

Fig 1 The instrumentations of flux covariance system.

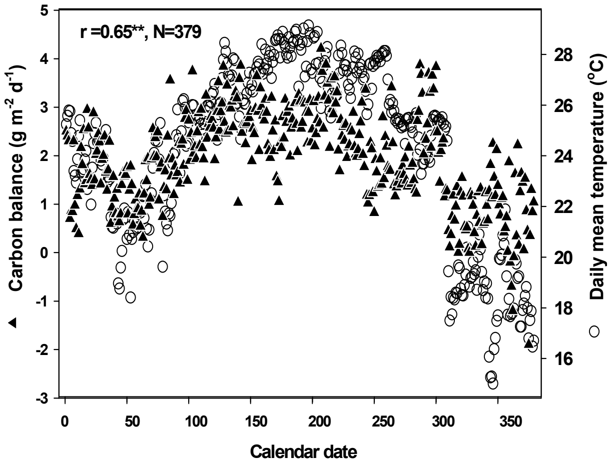

Fig 2 Changes of carbon balance and daily mean temperature in orchid field.

物之光反應及暗反應是分開進行，最佳光照利用碳平衡及葉綠素螢光參數量測所得結果為 300-500 μmol m^{-2} s^{-1}。除此之外，每日之日夜 1 個循環較 2 個及 3 個循環有更多碳固定量。潛熱與溫度及光度相關性皆不明顯，主要原因為水牆風扇干擾溫室內水汽狀態所致。

2.水稻田二氧化碳吸存量之研究

二氧化碳監測是農業生產及生態永續經營的重要工作，尤其是面對未來可能亟劇改變之氣候情景，農田二氧化碳逸散的收集及分析更顯得迫切。但農業是複雜的生態體系，包括氣候能量分布及碳素轉換機制，需更精確量測二氧化碳通量(flux)之瞬間變化，才能農田二氧化碳循環的產生、傳送及轉換有所瞭解水稻田的二氧化碳對於溫室氣體的平衡佔有重要角色。本研究利用通量技術直接量測水稻田之二氧化碳平衡，並和溫室排放模式 DNDC (DeNitrification DeComposition)作比較(圖 3)。結果顯示，水稻一期作之平均二氧化碳吸存量為 22.0 g m^{-2} day^{-1}，二期作為 17.9 g m^{-2} day^{-1}。吸存量受期作之葉面積指數影響，指數大則固定二氧化碳量多。土壤二氧化碳通量受土壤含水量影響，但在湛水環境則通量可忽略。比較不同量測二氧化碳吸收量的方式，和通量量測系統比較，密閉方式可能會有低估情形，尤其是在高光環境。

3.利用潛熱通量資料驗證水稻田蒸發散模式

水稻是我國主要糧食作物，同時水稻栽培對於氣候調節及涵養水源具有永續經營的意義，但水稻田用水量約佔農業用水 70%以上，在用水短缺時，如何更有效利用水資源是極重要課題。目前水田需水量常用模式去估算，缺乏實際測值，本文所提及之渦流相關系統的技術，可直接偵測水稻田潛熱，此能量項可作為水田蒸發及葉片蒸散之總量。因此，針對水稻田每一生育期實際耗水進行通量量測，提出水田蒸發散量實測數據，作為校驗水稻田之蒸散量模式，再依據氣象資料對大面積區域進行估算，才能對水資源作精準分配及使用。本研究利用水汽量測系統量測蒸發散量構成因子，以估算水稻田實測資料並以評估四種估算潛勢能蒸發散模式之準確度，結果顯示，以溫度為輸入值之 Hargreaves and Samanni 法高估蒸發散量(圖 4)，相反的，以輻射量為輸入值之 Miakkink 法則低估，Penman-Monteith 法和其簡化方程式(Priestley-Taylor method 法)則較能符合實測值。除此之外，本研究另一目的即利用蒸發散量實測值及氣象資料發展出適合之水稻作物係數，以 Penman-Monteith 方法估測潛能蒸發散量，比較由水汽量測系統所量測之實測值，結果顯示，水稻一期作之四個生育時期(幼苗期、分蘖期、抽穗期及成熟期)之作物係數，分別為 0.92、1.00、1.13 及 0.89；二期作則為 1.01、1.11、1.23 及 0.93。

4.荔枝園潛熱及二氧化碳通量之研究

本研究利用通量量測技術解決大面積監測果樹生理反應的限制，量測二氧化碳通量以瞭解荔枝 (*Litchi chinensis*) 果園植冠固碳能力，潛熱通量測值則代表果園實際蒸發散量。結果顯示，果園二氧化碳通量與太陽輻射量有直接關係 ($r = 0.87$)，並且與夜間溫度相關性亦高 ($r = 0.71$)。潛熱則與以氣溫及相對濕度所計算之水汽壓差相關係數最高($r = 0.70$)，至於常用於果園之水份監測指標，包括土壤水分含量、莖幹汁液流速、葉片蒸散量及氣溫-葉溫差值，與潛熱通量相關性並不高。因此，水汽壓差資料可做為荔枝果園水份管理之指標。

四、結論

作物生長監測利用生理量測儀器僅能作單葉及定點量測，缺少長期且連續監測功能，也無法提供大面積及夜間呼吸作用變化的監測，監測技術上的瓶頸限制一些議題的探討。氣象通量技術已打破過去氣象及農田作物量測在空間及時間上的限制，同時更能以長時間且精確的描述作物生長及監測農業環境。

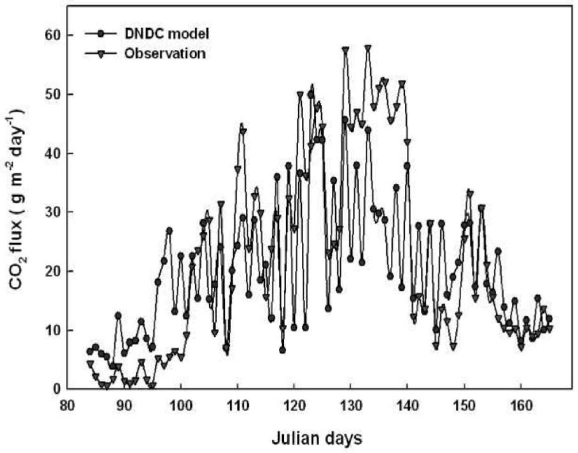

Fig 3 Comparisons between the measured and predicted CO_2 flux from above the canopy of rice.

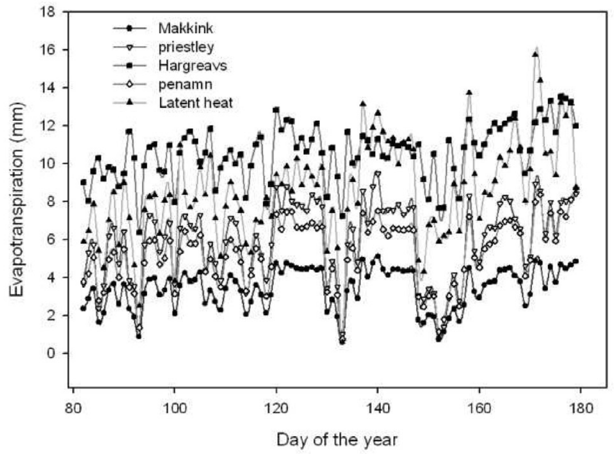

Fig 4 Comparisons between the four evapotranspiration models and latent heat for rice grown in the first cropping season.

參考文獻

1. 姚銘輝、陳守泓。2010。氣候變遷對農田碳循環及土壤碳封存之影響。氣候變遷及糧食危機研討會。P. 141-150。
2. 姚銘輝、陳守泓。2010。農田氣象通量之應用。生物碳潛力研議與碳管理策略研討會。P. 94-100。
3. 姚銘輝、陳俊仁、黃國祥。2011。荔枝園潛熱及二氧化碳通量之研究。台灣農業研究。60:211-220。
4. 姚銘輝、陳俊仁、黃國祥。2011。經由碳平衡及二氧化碳通量推估蝴蝶蘭園之最佳溫度及光照條件。作物、環境與生物資訊 8: 172-180。
5. 姚銘輝、陳俊仁。2011。農田二氧化碳逸散與土壤碳吸存之研究。土壤肥料管理對生態環境與農業生產之影響研討會。11-24。
6. Amiro, B. 2010. Estimating annual carbon dioxide eddy fluxes using open-path analyzers for cold forest sites. Agric. For. Meteorol. 150:1366-1372.
7. Jeng-Lin Tsai, Ben-Jei Tsuang, Po-Sheng Lu, Ken-Hui Chang Ming-Hwi Yao, and Yuan Shen. 2010. Measurements of aerodynamic roughness, Bowen Ratio and atmospheric surface layer height by eddy-covariance and tethersonde systems simultaneously over heterogeneous rice paddy. J. of Hydrometeorology 11:452-466. (SCI)

8. Ortega-Farias, S. O., A. Olioso, S. Fuentes, and H. Valdes. 2006. Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman-Monteith equation with a variable surface canopy resistance. Agric. Water Manage. 3: 421-432.
9. Swinbank, W.C. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. J. Meteorol. 8:135-145.
10. Tseng, K.H., J.L. Tsai, A. Alagesan, B.J. Tsuang, M.H. Yao and P.H. Kuo. 2010. Determination of methane and carbon dioxide fluxes during the rice maturity period in Taiwan by combining profile and eddy covariance measurements. Agricultural and Forest Meteorology 150:852-859.
11. Yao M. H, J. C Tsai, L. S Liang. 2003. Measurement of vertical profiles and fluctuations on agrometeorological factor within and above a rice canopy. (in Chinese with English Abstract) J. Taiwan Agric. Res. 52: 50-61.
12. Zhang, B. Z., S. Z. Kang, L. Zhang, T. S. Du, S. E. Li, and X. Y. Yang. 2007. Estimation of seasonal crop water consumption in a vineyard using Bowen ratio-energy balance method. Hydrological Processes 21: 3635-3641.

Application of flux technique in the observation of agrometeorology

Ming-Hwi Yao[1], Chun-Jen Chen[2]

[1] Senior Agricultural Engineer, Taiwan Agricultural Research Institute, COA

[2] Assistant Agricultural Engineer, Taiwan Agricultural Research Institute, COA

Abstract

The eddy correlation system was setup above crop canopy to record the flux data during crop growth for evaluate the model and monitor the agricultural environment. The uptake of carbon dioxide in rice paddies may play an important role in balancing the budget of greenhouse gases, As a result, the average net daily CO_2 uptake in first crop was 22 g m^{-2} day^{-1}, while it was 17.92 g m^{-2} day^{-1} in second crop. To evaluate the best temperature and light intensity conditions of *Phalaenopsis* facility by the measurement of daily carbon balance with CO_2 flux using eddy covariance technique for the purpose of improving orchid management in greenhouse cultivation, the results indicated the maximum carbon balance can be reached at the day/night temperature of 25/25℃ on leaf basis, and in range of 24-27℃ on the base of facility as a whole. Determining of the water requirement of rice is important for paddy field irrigation plan, this study were to measure evapotranspiration with eddy correlation system, and to validate four empirical equations of potential evaportranspiration by comparing the model's estimated values to calculated values of latent heat flux from paddy field, the results showed that Penman-Monteith method and its derived simplified equation (Priestley-Taylor method) were better fitted to the actual measurement values. In addition to, monitor the physiological responses of litchi (*Litchi chinensis*) in large field areas using the technique of flux measurement. The latent heat flux was highly correlated to the vapor pressure deficit which was calculated by measuring temperature and relative humidity ($r = 0.70$). Therefore, this study suggests that the vapor pressure deficit is a good index for the water management in litchi orchards.

Keywords：Flux、Crop model、Climate change、Greenhouse gas、Evapotranspiration.